LE TRANSPORT DE L'EAU A GRANDE DISTANCE

PAR G. COMBES * ET F. DE SAINT-LAURENT *

Lorsqu'on aborde un sujet comme celui du transport de l'eau à grande distance, on peut se demander, étant donné le nombre d'ouvrages, articles et communications publiés sur cette question, s'il existe encore des aspects de ce problème qui n'aient été abondamment traités.

Il nous semble donc à peu près impossible, en évoquant ce sujet, d'éviter toute banalité, d'autant plus qu'il s'agit là d'un problème que nous avons tous eu l'occasion d'aborder et que certains d'entre nous doivent connaître particulièrement bien. Aussi, comme aurait pu le dire Sir Winston Churchill, nous nous doutons bien que cette communication restera sans grand intérêt, pour certains tout le temps, pour tous un certain temps, mais nous espérons qu'elle ne sera pas dénuée d'intérêt pour tout le monde, tout le temps.

Nous commencerons par rappeler, avec quelques exemples, les principales « conquêtes » de la technique hydraulique au cours des âges, ceci, à la suite d'une entente avec M. Béchaux, qui présente une communication sur un sujet analogue, jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Nous indiquerons ensuite, de façon assez générale, comment se présente actuellement le problème du transport de l'eau, pour terminer par l'examen de l'influence de quelques paramètres sur le prix de revient de ce transport, principalement en conduites, ce qui nous permettra de proposer certaines conclusions concernant l'avenir du transport de l'eau à grande distance.

L'adduction à travers les âges

L'idée du transport de l'eau dans l'antiquité fait automatiquement penser aux aqueducs construits par les Romains, mais en fait, des installations hydrauliques tout à fait remarquables ont vu le jour à des époques très antérieures.

Découverts il y a une quarantaine d'années par des archéologues britanniques, des vestiges d'une civilisation du quatrième millénaire avant J.-C. s'étendent aux Indes sur une superficie de plus d'un million de km². Situé sur l'Indus, à 250 km au nord d'Haïderabad, un des centres de cette civilisation, Mohenjo-Daro, nous donne l'exemple d'une cité dont toutes les maisons étaient alimentées en eau, et reliées aux égouts; la plupart d'entre elles étaient pourvues de lavoirs, salles de bains et toilettes; en outre, la ville possédait plusieurs piscines publiques, et ceci il y a cinq mille ans.

Mohenjo-Daro était alimentée en eau par une nappe locale, ce qui nous écarte du sujet choisi, mais cet exemple montre que la réalisation d'adductions d'eau devait être à la portée des civilisations de cette époque.

En matière d'adduction, les plus anciennes réalisations connues sont largement postérieures; elles remontent aux Assyriens. Le roi Sennacherib, qui monta sur le trône en 705 avant J.-C., fit exécuter en particulier, un gigantesque canal revêtu de 80 km de long et de 20 à 25 m² de section: ce canal amenait à Ninive les eaux d'un barrage-réservoir créé sur le Gomel, et comportait comme ouvrage important: un pont-canal de 240 m de long pour la traversée du Jarwan (planche 1, A).

* Ingénieurs à la SOGREAH, Grenoble.

Planche 1

A/ Tracé du canal de Senacherib.
Route of Senacherib's canal.

B/ Le profil et les tuyaux de l'aqueduc de Pergame.
Pergamon aqueduct : profile of run and pipe details.

A/

B/

AQUEDUCS	DATE DE CONSTRUCTION	FONDATEURS	LONGUEURS DES AQUEDUCS (en m)				ALTITUDE A L'ARRIVÉE DANS LA VILLE PAR RAPPORT AU QUAI DU TIBRE (en m)	SECTIONS MOUILLÉES DES AQUEDUCS AVANT LA RÉVISION DE FRONTIN		SECTIONS MOUILLÉES DES AQUEDUCS APRÈS LA RÉVISION DE FRONTIN		DÉBITS QUOTIDIENS CORRESPONDANTS EN m³ D'APRÈS	
			Canalisations souterraines	Sub-structures	Arcades	Totales		en quinaires	en m²	en quinaires	en m²	Belgrand	Germain de Montauzan
APPIA	312 av. J.-C.	Censeurs Appius Claudius Crassus et Plautius.	16 420	44	88	16 552	8,37	704	0,2995	1 825	0,7788	65 000	54 750
ANIO VETUS	272 av. J.-C.	Comm. par le censeur Papirius Cursor, term. par Fulvius Flaccus. Préteur Marcius.	63 281	327	—	63 608	25,17	1 610	0,6850	4 398	1,8768	268 000	131 490
MARCIA	145 av. J.-C.	Censeurs Servilius Cepion et Crassus Longinus. Agrippa lorsqu'il fit fonction d'édile.	80 245	781	10 259	91 285	37,48	1 935	0,823	4 690	2,0014	101 000	140 700
TEPULA	126 av. J.-C.		8 461	781	9 574	18 816	38,23	445	0,1895	1 368	0,5838	50 000	41 040
JULIA	34 av. J.-C.		12 464	781	9 574	22 819	39,71	803	0,342				
ALSIIETINA	10 av. J.-C.	Auguste pour alimenter sa nautarchie.	32 269	—	530	32 799	± 5,00	392	0,167	392	0,1673	24 000	11 760
AUGUSTA (Prol. de Marcia du côté de sa source)	10 av. J.-C.	Auguste.	1 183	—	—	1 183	—	—	—	—	—	—	—
AUGUSTA (Affl. d'Appia)	—		9 437	—	—	9 437	—	—	—	—	—	—	—
VIRGO	21 av. J.-C.	Agrippa.	19 031	799	1 035	20 865	10,43	2 504	1,068	2 504	1,0685	61 000	75 120
CLAUDIA	36 à 50 ap. J.-C.	Caligula et Claude.	53 594	901	14 152	68 647	47,42	1 588	0,676	4 607	1,9660	101 000	138 210
ANIO NOVUS	52 ap. J.-C.	Caligula et Claude.	72 928	2 602	11 303	86 833	47,52	4 048	1,720	4 738	2,0219	283 000	142 140
			369 313	7 016	56 515	432 844		14 029	5,970	24 522	10,4645	953 000	735 660

Le quinaire : surface d'un cercle d'un diamètre de 5/4 de doigt ou de 0,02331 m = 4,26747 cm².

Planche 2/ Caractéristiques des aqueducs romains / Particulars of Roman aqueducts.

Deux siècles plus tard, les Grecs réalisent des aqueducs à écoulement libre, analogues ou plus complexes encore : l'aqueduc de Samos comportait en effet une galerie de 835 m, suivie d'un tunnel maçonné d'un kilomètre.

Aux III^e et II^e siècles avant J.-C., c'est-à-dire à l'époque où les Romains construisent leurs premiers aqueducs, les Grecs réalisent de véritables conduites en charge : c'est le cas des quatre derniers kilomètres de l'aqueduc de Pergame, où la pression devait atteindre, au point le plus bas, une vingtaine de kg/cm² (planche 1, B).

On ne sait pas quels tuyaux employaient les Grecs pour de telles conduites : la forme des blocs de pierre taillée, encastrés à distance régulière le long du tracé de la conduite de Pergame, suggère que ces blocs servaient à la fois de supports, de joints et éventuellement, de coudes à une conduite en bronze. En effet, en dehors des tuyaux en poterie, utilisés depuis la plus haute antiquité, mais qui n'auraient pas résisté à de telles pressions, les Grecs se servaient de tuyaux en plomb, mais d'un diamètre de 5 cm au plus, donc très inférieur à celui de la conduite de Pergame (Ø 20 à 25 cm). Ils utilisaient aussi des tuyaux en pierre, mais dont la forme n'était pas compatible avec celle des blocs-supports de la conduite.

Notons au passage que la plus ancienne conduite de cuivre connue a été retrouvée en Egypte, et qu'elle date de quatre mille ans.

Dans le domaine des adductions d'eau, comme dans beaucoup d'autres, les Romains ont été de grands bâtisseurs : on a découvert, dans les différentes contrées qu'ils ont occupées, les ruines de quelque 200 aqueducs qui furent souvent de remarquables réalisations. Toutefois, la technique hydraulique des Romains semble être restée en deçà de celle des Grecs.

Sous Nerva, onze aqueducs, dont le plus long dépassait 90 km, et dont le plus important débitait, selon Belgrand, plus de 3 m³/s, amenaient à Rome quelque 500 à 700 l d'eau par habitant et par jour (planche 2).

Les adductions romaines comportaient quelques galeries, principalement pour le captage, mais peu de véritables tunnels; leur majeure partie était constituée par des conduites enterrées, à écoulement libre; les tuyaux étaient en poterie, parfois en pierre : les tuyaux en pierre de l'aqueduc d'Apamée avaient 40 cm de diamètre intérieur, et 20 cm d'épaisseur; la distribution d'Apamée comportait également des tuyaux en béton de Ø 20 à 25 cm intérieur (planche 3).

Les Romains firent un large usage des tuyaux en plomb, dont les dimensions étaient normalisées : la codification de Nerva comporte 12 modules de Ø 2 à 15 cm. Mais ces tuyaux étaient rarement utilisés en adduction; une exception tout à fait remarquable à cet égard est celle des siphons de Lyon; la pression maximale atteignait 12 kg/cm² au siphon de Beaunant (planche 4); on estime que ces siphons absorbèrent 10 à 15 000 t de plomb. Les aqueducs de Lyon ont été construits entre 15 avant J.-C. et 140 après J.-C.

Il faudra attendre longtemps pour voir se réaliser des travaux analogues à ceux des Romains; citons rapidement les ouvrages, parfois modestes, réalisés entre l'époque romaine et le XVII^e siècle :

- aux VI^e et X^e siècles, deux petites adductions parisiennes, celle de Belleville (7 km de galerie de moellons), et celle du Pré-St-Gervais (10 km, tuyau en poterie, puis en plomb Ø 13,5 cm);
- 5 aqueducs italiens au XIII^e siècle;
- au XIV^e siècle, adduction de Coutances, comportant un pont-canal de 620 m de long et 21 m de haut;
- au XVI^e siècle, à Rome, l'aqueduc Felice (32 km, 2,5 m³/s).

On continue, pendant toute cette période, à employer des tuyaux en plomb, mais la soudure autogène des Romains est remplacée par la soudure à l'étain. On utilise également des tuyaux en poterie, et, pour de nombreuses adductions locales, des tuyaux en bois obtenus par percement à la tarière de troncs d'arbres ou de branches maîtresses (planche 5). Les tuyaux en fonte apparaîtront en Allemagne au XV^e siècle, ce sont des tuyaux de faible diamètre, à emboîtement (planche 6).

Nous en arrivons au XVII^e siècle, époque des grands travaux hydrauliques de Versailles qui for-

a/ Fouilles de l'aqueduc romain d'Apamée (les grosses conduites sont en pierre et les petites en béton).
Roman aqueduct excavation (Apamea).

b/ Tuyau d'Apamée en pierre.
Stone pipe (Apamea).

c/ Tuyaux d'Apamée en béton / Concrete pipes (Apamea).

Planche 3/ Tuyaux de béton et de pierre.
Concrete and stone pipes.

Aqueduc du Mont-d'Or.
 Aqueduc de Craponne.
 Aqueduc de la Brévenne.
 Aqueduc du Gier.

Longueur / Length	Débit quotidien / Daily flow
25 270 m	8 000 à (to) 15 000 m ³
?	12 000 à (to) 15 000 m ³
35 250 m	28 000 m ³
75 191 m	24 000 m ³
	72 000 à (to) 82 000 m ³

a/ Un des siphons de Lyon.

A siphon in the Lyons system.

b/ Ruines du réservoir de chasse du siphon de Beaunant et de son rampant.

Remains of Beaunant siphon flushing tank and ramp.

c/ Profil de trois des aqueducs de Lyon.

Three aqueduct profiles.

Siphons Siphon	Aqueducs Aqueduct	Pressions maximales en mètres Maximum pressure in metres	Longueurs en mètres Length (mètres)	Nombres de tuyaux Number of pipes	Diamètres extérieurs des tuyaux en mètres Pipe O.D. (mètres)
de Cotte-Chally (existence incertaine).	Mont d'Or	30 à 40	500	?	?
d'Ecully.	»	± 65	2 000	?	?
du Tupinier.	Craponne	± 25	1 300	?	?
des Tourillons.	»	± 115	4 800	?	?
de la Grange Blanche.	Brévenne	± 89	2 800	?	?
de Saint-Genis.	Gier	83	897	10	0,22
de Soucieu.	»	93	1 207	9	0,25-0,27
de Saint-Irénée.	»	47	608	7	?
de Beaunant.	»	123	2 612	± 10	0,25-0,27

d/ Caractéristiques des siphons de Lyon / Lyons siphon particuliers.

Planche 4/ Plan des aqueducs de Lyon / Plan of Lyons aqueduct system.

A/

A/ La fabrication des tuyaux de bois par forage à la main.
Hand boring of wooden pipes.

B/ Machine à forer les tuyaux de bois.
Wood pipe boring machine.

C/ Tuyaux de bois.
Wooden pipes.

Planche 5

B/

C/

A/

a/ Tuyaux de fonte primitifs / *Early cast-iron pipes.*

- A** Tuyaux en service jusqu'en 1760 au Château de Dillemburg et datant du XV^e ou du XVI^e siècle.
- B** Tuyau de 4 cm de diamètre utilisé à Braunfels (Allemagne) de 1661 à 1875, à la pression de 10 kg/cm².
- C** Tuyau de 5 cm de diamètre en service depuis 1684 à Bad Homburg (Allemagne).
- D** Tuyaux de 11,5 et de 14,5 cm de diamètre en service à Langensalza (Allemagne) depuis 1562.

Planche 6

b/ Un tuyau de fonte du parc de Versailles.
A cast-iron pipe from the Versailles gardens.

ment un système assez complexe d'alimentation en eau (planche 7).

Laissant de côté la toute première adduction, celle du ru de Glagny, qui date de Louis XIII, et la première amenée des eaux de la Bièvre, nous pouvons y distinguer :

- d'une part, deux systèmes, indépendants l'un de l'autre, d'étangs, rigoles d'alimentation et aqueducs souterrains, s'étendant l'un sur 10 km, l'autre sur 35 km environ : le tout comprenait 13 étangs et retenues, 190 km de rigoles et d'aqueducs, recueillant l'eau tombant sur 13 000 ha, et pouvant emmagasiner près de 8 millions de m³ d'eau. Le débit arrivant à Versailles restait cependant modeste : un million de m³ par an, soit, en moyenne, un peu plus de 30 l/s;
- d'autre part, l'adduction des eaux de Seine, refoulée par la machine de Marly à plus de 160 m de hauteur. Cette adduction, qui s'étendait sur 9 km, aurait dû fournir quelque 70 l/s; en fait, elle n'en donna jamais plus de la moitié.

Dans le cadre de notre exposé, nous devons surtout retenir pour Versailles :

- l'utilisation en grande quantité de canalisations en fonte de fort diamètre (jusqu'à Ø 0,50 intérieur); ce sont des tuyaux d'un peu plus de

- 1 m de long, à brides, avec des joints en plomb dont l'étanchéité était difficile à obtenir aux fortes pressions : les siphons prévus au Buc et à Satory durent être remplacés par des aqueducs;
- la première adduction en charge alimentée par pompe.

Par ailleurs, il serait regrettable de passer sous silence une adduction beaucoup plus importante, celle des eaux de l'Eure, dont la réalisation, quoique terminée aux trois-quarts, fut finalement interrompue par la guerre de la ligue d'Augsbourg. Il s'agissait de dériver l'Eure captée en amont de Chartres, à Pontgoin, par un canal de 83 km de long et 35 m² de section, avec deux ponts-canaux gigantesques, dont celui de Maintenon (5 km de long, hauteur maximale prévue 73 m). Cette adduction aurait fourni à elle seule à Versailles une quantité d'eau sans commune mesure avec les adductions précédentes.

Au XVIII^e siècle, on trouve un certain nombre d'adductions gravitaires comportant parfois d'importants ouvrages, pour des débits qui semblent aujourd'hui ridiculement faibles : l'aqueduc de Lisbonne (1743), de 18 km de long, dont 1 km sur arcades, débitait 20 l/s; celui de Montpellier (1786), qui comportait un pont-canal d'un kilo-

Planche 7/Plan des installations hydrauliques de Versailles / Plan of hydraulic installations at Versailles.

A/ Les aqueducs de Rome vers 1870.
Rome aqueducts around 1870.

a/

b/

c/

d/

e/

Planche 8

mètre et de 29 m de haut, fournissait 181/s. Par contre, celui de Caserte (Italie) (1753) de 42 km, dont 6 de tunnels, qui comportait un pont-canal de 540 m de long et 58 m de haut, débitait plus de 500 l/s.

Au début du XIX^e siècle, Napoléon fit creuser le canal de l'Oureq (96 km), canal navigable amenant à Paris l'eau de la Marne, refoulée par des pompes. Ce canal, plus le pompage des eaux de Seine, donnaient aux Parisiens quelque 100 l par habitant et par jour à cette époque.

Malgré l'expérience acquise à Versailles, il faudra plus d'un siècle pour voir s'imposer le tuyau en fonte, et pour voir se réaliser d'importantes adductions par conduites en charge : une des premières réalisations de ce genre semble être l'aqueduc Pia, à Rome (reconstruction de l'ancien aqueduc Marcia) (planche 8, A).

B/ Conduite de Coolgardie et de Kalgoorlie (Australie). Coolgardie and Kalgoorlie pipeline, Australia

a/ Manchons d'assemblage / Sleeve connectors.

b/ Tuyaux Mephan-Ferguson assemblés par le locking bar system / Mephan-Ferguson pipes joined by locking bar system.

c/ Baguette d'assemblage des tuyaux / Bead joint.

d/ Profil en long de la conduite / Longitudinal pipe route profile.

e/ Plan de la conduite / Plan pipe layout.

Cette adduction, réalisée en 1870, comportait :
— une section de 27 km à écoulement libre, dont le tracé suit celui de l'aqueduc Marcia ;

— une section en charge, également de 27 km (contre 65 km pour la section correspondante de l'aqueduc Marcia), réalisée en tuyau de fonte de $\varnothing$ 60 cm, en éléments de 3,65 m, à emboîtement. La charge était de l'ordre de 10 kg/cm². La conduite de 1870 fut doublée en 1878, triplée en 1885.

Outre l'amélioration du tuyau en fonte, le XIX^e siècle voit l'apparition du tuyau en fer soudé longitudinalement (Angleterre 1825) puis, à la fin du siècle, le tuyau en acier sans soudure (Allemagne).

Dès 1870, on pensait au moulage du tuyau en fonte par centrifugation ; il faudra attendre 1923 pour le voir se réaliser en Europe.

Nous voudrions terminer ce rappel historique

par une réalisation entreprise à la fin du XIX^e siècle : l'adduction de Coolgardie et Kalgoorlie (Australie), longue de 565 km, fut entreprise en mars 1898 et terminée en janvier 1903 (planche 8, B).

Réalisée en tuyaux d'acier, Ø 76 cm, formés de deux demi-cylindres assemblés le long des génératrices de contact par des baguettes d'assemblage, cette conduite peut débiter près de 300 l/s. L'eau, prélevée à une cinquantaine de km de la côte de l'océan Indien, aux environs de la cote 100, est refoulée par 8 stations de pompes successives, jusqu'à la cote 500, atteinte au kilomètre 475; la cote d'utilisation est 410 environ. La hauteur totale de refoulement, avec les pertes de charge, atteint 820 m.

À la mise en service, les pertes totales par évaporation et fuites, n'atteignaient pas 1 l/s.

Compte tenu, il est vrai, d'un taux d'intérêt de 6,5 %, et d'un amortissement en trente-trois ans, le prix de vente normal d'un mètre cube d'eau avait été établi à l'époque à 1,10 franc-or, soit environ 5 de nos francs. Avec un taux d'intérêt de 3 % seulement, et un amortissement en cinquante ans, le coût du transport seul atteignait 2,50 à 3 F, soit environ 0,005 F par mètre cube et par kilomètre, coût très largement supérieur à celui que l'on peut espérer aujourd'hui pour un débit analogue.

Problème du transport de l'eau

Bien sûr, l'hydraulicien d'aujourd'hui dispose de moyens qui se sont considérablement améliorés depuis cette époque et, *a fortiori*, depuis la Renaissance ou l'antiquité : le refoulement de grosses quantités d'eau à des hauteurs importantes n'est plus un problème, l'industrie fournit des matériaux de qualité et tout spécialement des canalisations qui, malgré des dimensions sans cesse accrues, peuvent se prêter à des conditions d'emploi de plus en plus sévères; pensons aussi au béton armé, au béton précontraint, à la protection cathodique, aux appareils de régulation et à la télécommande, comme à l'amélioration des engins de manutention et de terrassement.

Face à un problème donné d'adduction d'eau, ces moyens permettent souvent d'envisager un assez large éventail de solutions, que l'on qualifiera volontairement de « modernes »; pourtant, dans l'essentiel, on fera appel à des techniques vieilles de quelques millénaires pour transporter l'eau, puisque l'on envisagera, selon les circonstances :

- l'utilisation de cours d'eau naturels;
- les canaux à ciel ouvert;
- les canaux recouverts et les conduites à écoulement libre;
- les conduites en charge.

Les critères du choix entre les véhicules.

Le choix entre ces divers moyens doit, dans chaque cas, faire l'objet d'une étude tenant compte d'un certain nombre de critères qui sont, en particulier :

- les conditions du milieu traversé par l'adduction : climat, nature et topographie du terrain,

conditions hydrologiques en surface et à faible profondeur, végétation, peuplement;

- les critères techniques tels que l'origine et la destination de l'eau, la sécurité (au sens militaire du terme), la régulation du débit, et la souplesse d'utilisation;
- les critères économiques et parfois aussi les considérations politiques, telles que le désir de résorber le chômage.

L'examen simple de quelques-uns de ces critères, permet assez souvent d'orienter le choix, dès la toute première conception du projet.

Le canal à ciel ouvert ne peut s'envisager que dans des conditions topographiques plutôt favorables; dans ce cas, il reste l'ouvrage le moins dispendieux, mais son utilisation ne va pas sans inconvénients : le risque de pollution conduit à l'éviter pour le transport d'eau potable (il devrait même être totalement éliminé pour cet usage lorsque l'on transporte une eau claire à l'origine); de même, le canal doit être évité, ou son accès interdit, à proximité des agglomérations où il a toujours tendance à être utilisé comme décharge publique.

En outre, les canaux à ciel ouvert sont soumis aux conditions climatiques et peuvent présenter, selon les régions, soit le risque de gel, soit le risque d'ensablement et de pertes importantes par évaporation; le vent y crée des vagues susceptibles d'occasionner des désordres dans les berges; enfin, et spécialement dans les régions ensoleillées, les canaux peuvent être le siège de prolifération d'algues.

Au prix d'une réalisation étudiée comportant en particulier une surélévation des berges, et grâce à un appareillage assez complexe, les canaux peuvent se prêter à une régulation par l'aval (en fonction de la demande).

Dans ces conditions, le transport d'eau par utilisation des cours d'eau naturels et par canaux à ciel ouvert semble réservé aux débits importants et aux cas où la majeure partie de l'eau n'est pas destinée à être distribuée comme eau potable. Les grands canaux récents (canal du Bas-Rhône-Languedoc, canal de Provence), qui répondent à cette utilisation, sont des canaux revêtus; l'irrigation fait également un large usage de canaux préfabriqués en béton précontraint et posés sur appui, pour des débits atteignant parfois 5 à 10 m³/s.

Les autres systèmes d'adduction évitent la plupart des inconvénients des canaux à ciel ouvert. Mais, seule, la conduite en charge permet de faire face aux problèmes posés par le relief; elle se prête de façon simple à la régulation des débits par l'aval, sans ligne de transmission extérieure; elle se prête également, dans le cas où l'accroissement de la consommation aurait été sous-estimé et, grâce à l'utilisation de surpresseurs, à une certaine augmentation du débit transporté, ce qui peut permettre de faire face momentanément à une situation délicate, en attendant la réalisation d'un projet de plus grande envergure. Enfin, seule, la conduite toujours en charge grâce à la régulation par l'aval élimine, dans tous les cas, le risque de pollution.

Tous ces avantages permettent de comprendre la place actuellement prise dans les adductions par les conduites en charge. Cependant, pour des raisons économiques, un certain nombre de gran-

des adductions récemment mises en service ou en cours d'exécution font appel à des solutions mixtes : canaux ou conduites à écoulement libre, remplacés, pour les passages difficiles, par des tunnels ou par des siphons en charge. Un tel système à écoulement libre, parfois alimenté au départ par refoulement, grâce à une conduite en charge, se termine en général par un réservoir et une station d'épuration d'où part une section de conduite en charge permettant d'alimenter l'agglomération desservie sous une pression suffisante.

Le choix du matériau constitutif de la conduite.

A côté de ces exemples, on pourrait citer de nombreuses adductions, gravitaires ou non, qui sont réalisées de bout en bout par des conduites en charge. Pour de telles adductions, le choix du matériau constitutif de la conduite s'avère parfois difficile. Il existe d'une part les conduites métalliques; l'augmentation des débits et donc des diamètres conduit de plus en plus à écarter la fonte grise dans les grandes adductions; restent donc en compétition l'acier, et un nouveau matériau qui monte, la fonte ductile ($\varnothing$ 2,20 m au Japon).

Par ailleurs, nous avons les conduites en béton, à âme en tôle ou en béton précontraint, comportant un fût primaire centrifugé, fretté et dont le frettage est protégé par une couche de béton extérieure.

Enfin, il semble que les fabricants de canalisation en amiante-ciment soient décidés, eux aussi, à se faire une place dans le marché des grandes adductions : certains fournisseurs proposent en effet des conduites de $\varnothing$ 1,50 m et plus, avec des pressions de service atteignant 10 à 15 kg/cm².

Nous manquons d'expérience pour établir une comparaison valable entre l'amiante-ciment (ou la fonte ductile) et les autres matériaux. De leur côté, l'acier et le béton précontraint ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients.

L'acier aura une meilleure tenue en terrain instable, mais une résistance moindre en terrain agressif, et ce sont souvent les mêmes. En outre, la durée de vie de l'acier est moindre : MM. Linaweaver et Scott Clark, dans un article fort documenté paru en décembre 1964 dans le journal de l'American Water Works Association, préconisent un amortissement de cinquante ans pour l'acier, de cent ans pour le béton.

Mais le choix entre ces deux matériaux sera surtout fonction de la *pression de service*. En effet, le coût de la canalisation en béton précontraint croît régulièrement depuis une pression de service nulle jusqu'à une pression comprise, selon le diamètre, entre 10 et 15 kg/cm² : au-delà de cette pression, l'augmentation de l'épaisseur du fût primaire provoque une forte augmentation du coût qui continuera ensuite à croître régulièrement. Pour fixer les idées, disons que si une conduite de $\varnothing$ 1 500, pression de service 11 kg/cm² revient à 700 F le mètre, une conduite de $\varnothing$ 1 600, pression de service 11 kg/cm², reviendra à 760 F le mètre (majoration de 9 %) et une conduite de $\varnothing$ 1 500, pression de service 12 kg/cm², à 800 F le mètre (majoration de 13 %).

De leur côté, les canalisations en acier de grand diamètre seraient beaucoup trop souples et auraient une tendance fâcheuse à l'ovalisation, si on les

réalisait pour supporter des pressions de quelques kg/cm² seulement : l'utilisation de telles conduites imposerait non seulement la reprise en chantier des revêtements de protection, mais encore l'exécution de remblais absolument homogènes : on préfère finalement accroître l'épaisseur de la conduite, dont le coût restera donc constant jusqu'à une pression de service de l'ordre de 15 kg/cm² et croîtra régulièrement ensuite avec la pression.

L'acier sera donc, de préférence, le matériau constitutif des conduites haute pression, le béton précontraint celui des conduites basse pression; les pressions moyennes (10 à 20 kg/cm²) couramment pratiquées, laissent donc un choix très large à la compétition entre ces deux matériaux.

En général, la prise en considération de la *durée de vie* des ouvrages joue en défaveur de l'acier; elle peut même défavoriser la conduite en charge au profit du canal. En effet, les constructeurs d'adduction savent que l'eau conservera toujours sa valeur, et fera l'objet d'une demande sans cesse croissante : ils ont donc eu, au cours des âges, et ils ont plus que jamais une tendance naturelle à réaliser des ouvrages dont la durée de vie soit aussi longue que possible.

Mais, dans ce cas exceptionnel où l'intérêt d'une adduction serait limitée dans le temps, il deviendrait nécessaire d'amortir assez rapidement les installations : on serait alors conduit à réduire le diamètre des canalisations et à admettre des pertes de charge, et par conséquent des pressions de service, beaucoup plus élevées.

Ce cas, exceptionnel pour l'eau, devient assez général pour les pétroliers qui ne peuvent se baser sur une certitude d'emploi, aussi longue que la durée de vie normale des conduites.

Dans la pratique, les pétroliers prendront en compte une durée d'amortissement des installations comprise entre cinq et dix ans; c'est là une des justifications de l'emploi quasi exclusif de l'acier pour la construction des oléoducs et des gazoducs. Il faut remarquer que l'acier s'imposait par ailleurs pour le transport des produits bruts, en raison des pertes de charges élevées et de la nécessité de prévoir le passage de racleurs. Notons enfin l'utilisation, beaucoup plus fréquente que pour l'eau, de canalisations de petit diamètre, pour lesquels la compétition entre l'acier et les autres matériaux est assez serrée, et signalons au passage que si les produits pétroliers détiennent le record en matière de distance de transport, les maximums atteints par l'eau, en matière de débit, restent largement supérieurs, même si l'on ne considère que le transport par conduite en charge.

Le coût du transport de l'eau

Influence de divers facteurs.

En dehors de la durée de vie des installations, le coût du transport de l'eau à grande distance dépend d'un certain nombre de facteurs déjà évoqués à propos du choix du système d'adduction. Parmi ces critères, les conditions du milieu, et tout particulièrement le relief et la nature du terrain, sont susceptibles de faire varier, dans une assez large mesure, le coût du transport, mais cons-

8 bis/ Projet d'alimentation en eau Irak-Koweït. Schéma d'ensemble des diverses solutions
Iraq-Kuwait water supply scheme. Proposed layouts.

tituent, pour chaque adduction, un cas d'espèce. D'autres facteurs peuvent faire l'objet d'une étude plus systématique, par exemple :

- le coût de l'énergie;
- le coût de l'argent;
- les quantités transportées.

Etude, sur un exemple, de l'influence de divers facteurs.

Nous avons étudié l'influence de ces paramètres dans le cadre d'une adduction que nous avons récemment étudiée au stade préliminaire : l'alimentation en eau de Koweït à partir des cours d'eau du sud de l'Irak.

Cette étude préliminaire, sorte de concours entre six sociétés d'ingénieurs-conseils de quatre nationalités différentes, n'imposait aucun lieu de prise particulier.

Le débit à prélever était de 200 millions de gallons par jour ($6,3 \text{ m}^3/\text{s}$).

Compte tenu d'un certain nombre d'éléments, et en particulier de l'utilisation à des fins agricoles de l'eau non consommée dans le réseau urbain, il était possible de prévoir une adduction continue au débit maximal.

Nous avons proposé deux solutions :

- une adduction de 320 km, avec prise à Bad'a dans un défluent du Tigre, le Shatt al Gharraf (solution longue);
- une adduction de 177,5 km, avec prise à l'amont de Basrah dans le Shatt al Arab (le Shatt al Arab est formé de la réunion du Tigre et de l'Euphrate) (solution courte).

Malgré son coût notablement plus élevé, nous recommandons la solution longue en raison de la qualité de l'eau : l'eau du Shatt al Gharraf est

de bonne qualité, et ne présente pas de risque d'une évolution par trop défavorable; l'eau du Shatt al Arab contient, à certaines époques, 1 200 à 1 300 mg/l de sels dissous, avec une teneur de SO_4 de près de 10 meq/l, et elle risque d'évoluer de façon excessivement défavorable. Mais la solution que nous préconisons s'est heurtée à l'opposition de l'Irak, obligeant Koweït à adopter, malgré ce grave inconvénient, la solution courte.

Les solutions étudiées aboutissaient toutes deux à un point haut, le site de Mutla, à 40 km de Koweït. A partir de ce point, il était possible de poursuivre l'adduction par gravité, grâce à une conduite de $\varnothing 150 \text{ cm}$.

La solution longue comprenait :

- en Irak, sur 200 km, deux conduites de $\varnothing 180 \text{ cm}$, avec une station de pompage en tête et une station de reprise au km 117;
- au Koweït, jusqu'à Mutla (80 km), deux conduites de $\varnothing 150 \text{ cm}$ avec stations de reprise aux km 200 et 235.

La puissance à installer était de l'ordre de 23 000 kW, uniformément répartie entre les 4 stations de pompage.

Une variante, comportant un canal jusqu'au-delà de la traversée de l'Euphrate (70 km), était également présentée.

La solution courte comprenait :

- en Irak, sur 65 km, deux conduites de $\varnothing 170 \text{ cm}$, avec une station de pompage en tête;
- au Koweït, jusqu'à Mutla (72,5 km), deux conduites $\varnothing 150 \text{ cm}$, avec station de reprise aux km 65 et 100.

La puissance à installer était de l'ordre de 21 000 kW, dont 3 700 kW en Irak et 7 150 pour chacune des stations situées au Koweït.

Toutes ces solutions étaient basées sur l'emploi de canalisations en béton précontraint qui, sur la base des conditions économiques adoptées, semblaient nettement plus économiques.

L'emploi d'une conduite double sur toute la longueur du tracé était justifié par des considérations de sécurité, et conforme aux désirs exprimés par le maître de l'œuvre.

Certaines des conditions économiques du projet, imposées soit par les circonstances, soit par le maître de l'œuvre, étaient un peu particulières notamment en ce qui concerne :

- le prix de l'énergie, différant d'un côté à l'autre de la frontière : électricité à 0,02 F/kWh, ou moins, au Koweït, à 0,04 F/kWh, ou plus, en Irak; gaz naturel gratuit au Koweït (sur les lieux de production) et vendu 0,023 F/m³ en Irak (sur le lieu d'emploi); cette différence du coût de l'énergie explique le choix de diamètres différents en Irak et au Koweït;
- le coût de l'argent; il fallait en effet calculer, au taux de 6,5 %, le montant du capital permettant de faire face aux dépenses annuelles de fonctionnement et d'entretien, puis ce capital devait être ajouté aux investissements, pour être ensuite amorti au taux de 3 %; ceci revenait à ne prendre en compte les frais annuels que pour 57 % de leur valeur réelle.

Les durées de vie imposées par le maître de l'œuvre variaient de quarante-cinq ans (terrassment, génie civil), à trente-cinq ans (canalisations en béton), ou trente ans (canalisations en acier), et à vingt ans (équipement électromécanique).

Par ailleurs, le coût des matériaux, un peu plus élevé qu'en Europe, se trouve compensé par l'absence totale de taxes, impôts ou droits de douane, ce qui conduit à des coûts d'ouvrages assez analogues à ceux obtenus en France.

Le coût du transport de l'eau, hors stockage et traitement, et calculé dans les conditions économiques ci-dessus, était finalement estimé à :

- $0,46 \cdot 10^{-3}$ F/m³.km pour la solution longue; avec la variante comportant un canal sur 70 km, ce coût était ramené à $0,40 \cdot 10^{-3}$ F/m³.km;
- $0,54 \cdot 10^{-3}$ F/m³.km pour la solution courte.

Nous avons repris ces calculs dans le cas de la solution courante en adoptant :

- une durée de vie de cinquante ans pour les canalisations, vingt-cinq ans pour l'équipement électromécanique;
- un découpage du tracé en deux ou trois sections, soit, outre la station de pompage en tête, une ou deux stations de reprise (la solution étudiée comportait deux stations de reprise);
- une double conduite en béton précontraint, sur toute la longueur du tracé;
- un taux d'intérêt variant de 2 à 8 %;
- un coût d'énergie variant de 0,02 à 0,10 F/kWh.

Nous avons vu que, dans la solution étudiée, le coefficient d'utilisation était de 100 % (adduction continue au débit maximal). Ce cas étant plutôt favorable, nous avons admis, dans les nouveaux calculs, que la quantité d'eau transportée suivrait l'accroissement de la consommation, conformément à des hypothèses voisines de celles prises en compte

dans notre étude, c'est-à-dire une consommation de 60 millions de m³/an à la mise en service et augmentant régulièrement de 7 millions de m³ chaque année, ce qui permet, dans le cas de deux conduites, de réaliser le projet en deux étapes; le coefficient d'utilisation adopté est donc ramené à 79 %.

Il convient de remarquer que dans le cas d'une activité croissante, l'amortissement des investissements par annuités constantes, ne permet pas de dégager un prix de revient constant pour cette activité. Le calcul a donc été effectué en amortissant proportionnellement aux quantités d'eau transportées chaque année un capital formé :

- d'une part, par la valeur, au jour « J » de la mise en service du projet, de toutes les dépenses d'investissement, qu'il s'agisse d'investissements précédant le jour « J » (travaux de première tranche), d'investissements différés (travaux de seconde tranche), ou de renouvellement du matériel dont la durée de vie propre est inférieure à celle du projet;
- d'autre part, par la valeur, capitalisée au jour « J », des frais fixes d'exploitation.

Par ailleurs, on a calculé directement les frais proportionnels aux quantités d'eau transportées, c'est-à-dire ici les frais d'énergie, pour les ajouter à l'amortissement précédemment calculé et former ainsi le prix de revient.

Le calcul a été effectué pour les diamètres suivants :

- deux sections : Ø 160, 170 et 180 cm;
- trois sections : Ø 140, 150, 160 et 170 cm.

Résultats obtenus.

Les graphiques de la planche 9 schématisent, pour chacun des cent-huit cas envisagés, la détermination du diamètre économique.

Ces diamètres économiques sont les suivants : (pour trois sections)

- Ø 150 cm, pour lequel $J = 1,35$ m/km
et $V = 1,78$ m/s
- Ø 160 cm, pour lequel $J = 1,00$ m/km
et $V = 1,57$ m/s

(pour deux et trois sections)

- Ø 170 cm, pour lequel $J = 0,72$ m/km
et $V = 1,39$ m/s
- Ø 180 cm, pour lequel $J = 0,54$ m/km
et $V = 0,99$ m/s

Comme le montre la planche 10, le coût du transport varie de façon sensiblement linéaire avec le coût de l'énergie, l'accroissement du coût du transport étant de l'ordre de $4 \cdot 10^{-5}$ F/m³.km pour un accroissement de 0,01 F du coût du kWh.

L'influence du taux d'intérêt est particulièrement sensible; l'accroissement du coût du transport augmente avec le taux d'intérêt, et ceci d'autant plus que le coût de l'énergie est plus fort; la variation du coût du transport est comprise entre 8 et $12 \cdot 10^{-5}$ F/m³.km lorsque le taux d'intérêt varie de 1 %.

Pour un taux d'intérêt faible, la différence de coût entre deux et trois sections reste peu importante et peu même s'annule lorsque l'énergie est chère; il existe donc une hauteur critique du refou-

Planche 9/ Coût du transport de l'eau en fonction de divers paramètres / Water conveyance cost in terms of various factors.

lement à chaque station, hauteur que l'on a intérêt à ne pas dépasser, et qui décroît lorsque le taux d'intérêt augmente.

Quelques calculs complémentaires ont été effectués dans le cas d'un taux d'intérêt de 3 % et d'un coût d'énergie de 0,05 F/kWh.

Si l'on fait varier le coefficient d'utilisation, qui, dans l'exemple étudié, est de 79 %, on obtient les résultats ci-après :

	Ø en cm	50 %	79 %	100 %
		(10 ⁻³ F/m ³ .km)		
3 sections	150	0,87	0,65	0,57
	160	0,85	0,62	0,53
	170	0,85	0,61	0,51
2 sections	160	0,90	0,65	0,56
	170	0,86	0,62	0,53
	180	0,88	0,62	0,53

Si l'on remplace la conduite double (2 × 3,15 m³/s), par une conduite simple véhiculant 6,3 m³/s, on obtient le résultat suivant :

	Ø en cm	10 ⁻³ F/m ³ .km
3 sections	210	0,55
	220	0,54
	230	0,52
2 sections	220	0,55
	230	0,54
	240	0,53

Généralisation des résultats.

En étendant à des débits voisins, les résultats obtenus pour 2 × 3,15 et pour 6,3 m³/s, nous obtenons les résultats ci-après, valables pour un taux d'intérêt de 3 % et un coefficient d'utilisation de 75 % :

— adduction gravitaire, pente de 1 m/km :

Débit (m ³ /s)	10	5	2,5	1,25
Coût (10 ⁻³ F/m ³ .km)	0,20	0,28	0,40	0,60

— adduction par pompage sans différence de niveau entre les points de départ et d'arrivée, énergie à 0,05 F/kWh :

Débits (m ³ /s)	10	5	2,5	1,25
Coût (10 ⁻³ F/m ³ .km)	0,50	0,58	0,70	0,90

Rappelons que ces coûts ont été calculés à partir d'un exemple particulier, présentant des conditions de relief et de terrain assez favorables; il serait probablement intéressant de les confronter avec ceux que l'on pourrait calculer sur la base d'autres exemples.

Conclusion

Les coûts que nous avons obtenus sont relatifs au seul transport de l'eau; pour arriver au coût global de l'eau, il faut tenir compte en outre :

- des ouvrages de prise d'eau, barrages ou forages dans une nappe, éventuellement réservoir de régularisation;
- de l'épuration de l'eau et de son stockage.

Toutefois, pour de grandes distances, le coût du transport forme l'élément le plus important du coût de l'eau, et il est intéressant de le comparer avec le coût d'une eau obtenue par d'autres moyens, en particulier la distillation de l'eau de mer.

Le coût de l'eau distillée, pour des productions de 1 à 10 m³/s, et pour un prix d'énergie moyen, s'établit actuellement aux environs de 0,40 F/m³; même en utilisant au mieux l'énergie atomique et la production combinée d'électricité, il ne semble

Planche 10/ Coût du transport de l'eau en fonction de divers paramètres / Water conveyance cost in terms of various factors.

pas que ce coût puisse descendre à moins de 0,20 ou 0,25 F/m³.

Sur la base des résultats que nous avons obtenus, le coût de production de l'eau distillée serait donc au moins égal au transport de l'eau sur :

- 1 000 km (gravitaire) ou 400 km (pompage) pour un débit de 10 m³/s;
- 700 km (gravitaire) ou 350 km (pompage) pour un débit de 5 m³/s;
- 500 km (gravitaire) ou 300 km (pompage) pour un débit de 2,5 m³/s;

Il semble donc que, malgré les progrès accomplis dans la technique de la distillation de l'eau de mer, le transport de l'eau puisse néanmoins être envisagé sur des distances considérables, même lorsqu'il s'agit de fournir de l'eau à des cités voisines de la mer.

Bibliographie

- CHARLENT (H.). — Les canalisations à travers les âges. *Courrier de la Normalisation* (novembre-décembre 1961).
- BUFFET (B.) et EVRARD (R.). — L'eau potable à travers les âges. Editions Solédi, Liège (1950).
- De BURFEVENT (M.). — L'adduction des eaux de Versailles.
- RAULIN (R.). — Alimentation de Coolgardie en eau potable par une conduite de 565 kilomètres. *Le Génie Civil* 2^e semestre 1905).
- VIROT (G.). — Economie et dimensionnement des pipe-lines. *L'Ingénieur-Constructeur* (juin 1966).
- LINAWEAVER JR. (F.P.) et SCOTT CLARK (C.). — Cost of water transmission. *Journal de l'A.W.W.A.* (décembre 1964).

Cette communication et la suivante font l'objet de la discussion publiée en page 364.

Abstract

Long-distance water supply systems

by G. Combes * and F. de Saint-Laurent *

This article is in two parts : a historical review and an exposé on present water conveying problems.

In the historical part, while the authors mention major achievements at various periods, they have mainly set out to give fuller details of some of the principal "conquests" of hydraulic engineering down the ages. This is a very old branch of engineering indeed : over 5 000 years ago all the houses at Mohenjo Daro on the river Indus had running water and sewerage; most of them had washrooms, bathrooms and lavatories, and there were public baths in the town.

The main examples of old long-distance water supply systems mentioned by the authors are the following :

- (i) Long-distance aqueducts with free gravity flow, e.g. the Niniveh canal in the seventh century B.C., Greek aqueducts from the fifth century B.C. onwards and Roman aqueducts from the third century B.C. onwards;
 - (ii) Pipelines under pressure, e.g. the bronze Pergamon water supply pipeline (Greece) in the third century B.C., siphons in the Lyons aqueduct in Roman Gaul and lead pipes, all in the last few centuries B.C. and the first few A.D.;
 - (iii) Water supplies delivered by pumping plant under pressure and a large-diameter cast-iron pipe at Versailles, France in the seventeenth century.
- The authors end their historical review with two examples which can be considered precursors of modern practice :
- (i) The Pia aqueduct in Rome (1870) in which 27 km of gravity-fed pipe under pressure replaced a 65 km long free-flowing aqueduct;
 - (ii) The pump-fed Coolgardie and Kalgoorlie pipeline in Australia (1903), which is 565 km long and delivers water from the 100 ft up to the 410 ft level via eight successive booster stations.

After this historical review, the authors observe that in spite of the much-improved means at their disposal, modern hydraulicians still basically rely on water-conveying methods centuries or even a few thousand years old, such as the following for example :

- (i) Use of natural streams, rivers, etc.;
- (ii) Open canals;
- (iii) Covered canals and freely flowing ducts;
- (iv) Pipes under pressure.

The authors discuss the merits and disadvantages of these methods and then those of various water-conveying duct materials; finally, they determine with the aid of an example the effect of such factors as power cost, interest rates and discharge on water conveying costs.

The authors conclude that, with high flows, it may be more economical to convey water over a distance of several hundred kilometres than to distill sea water; consequently, any choice between a long-distance supply system and distillation plant should be based on a very thorough economic study.

* Ingénieurs à la SOGREAH, Grenoble.